

## 플러그인 디지털 프레임웍을 위한 연결부 전역민감도 해석<sup>§</sup>

이두호<sup>\*†</sup> · 원영우<sup>\*</sup> · 권종현<sup>\*\*</sup>

\* 동의대학교 기계공학과, \*\* (주) 호창엠에프 기술개발팀

## Global Sensitivity Analysis of Joints for Plug-in Digital Framework

DooHo Lee<sup>\*†</sup>, Young-Woo Won<sup>\*</sup> and Jong-Hyun Kwon<sup>\*\*</sup>

\* Dept. of Mechanical Engineering, Dongeui Univ.,  
\*\* Hochang MF Ltd.

(Received January 11, 2016 ; Received March 5, 2016 ; Accepted March 7, 2016)

**Key Words:** Global Sensitivity Analysis(전역민감도해석), FRF-based Substructuring(전달함수기반 부분구조), Random Balance Design(무작위균형설계)

**초록:** 플러그인 디지털 프레임웍은 계의 구성요소가 블랙박스 형태로 구성되어 있을 때 계의 응답을 해석하는 도구이다. 일반적으로 구성요소를 연결하는 동역학계의 연결부는 계의 응답에 크게 영향을 미치게 되고, 많은 경우 연결부의 특성은 변위와 주파수에 따라 달라지는 특성을 보인다. 그러므로 연결부의 특성에 대한 민감도의 계산은 전역적으로 수행되어야 한다. 본 연구에서는 플러그인 디지털 프레임웍에서 연결부의 전역민감도를 계산하는 방법을 주파수응답함수 기반의 부분구조합성법을 기반으로 제시한다. 일차 전역민감도는 무작위균형설계법을 이용하여 적은 수의 샘플링으로 각 인자영향을 계산할 수 있다. 이 방법은 승용차의 실내소음에 대한 각 연결부 강성의 민감도를 계산하는 예에 적용함으로써 그 효용성을 검증하였다.

**Abstract:** Plug-In Digital Framework is a system response analysis tool that is employed when system components are composed of black-box modules. Generally, the dynamic characteristics of joints between the system components significantly affect system responses, and they lead to displacement- and frequency-dependent stiffness and loss factor. Thus, the sensitivity of each joint parameters should be estimated from a global perspective. In this study, we introduce a global sensitivity analysis procedure under the Plug-In Digital Framework. To efficiently calculate the system responses, we introduce the frequency response function (FRF)-based substructuring method. Using the random balance designs (RBD), we generate the system responses and estimate the global first-order sensitivities for each joint stiffness. We apply the proposed global sensitivity analysis method to an interior noise problem of a passenger car, and we evaluate the efficiency of the global sensitivity analysis method.

- 기호설명 -

$E$  : 기대값  
 $f$  : 외력벡터  
 $\Gamma$  : 부분구조의 경계영역  
 $H$  : 결합된 주파수응답함수 행렬  
 $K_{ki}$  : 두 부분구조를 연결하는 연결부 강성

$Q$  : 기지의 외력벡터  
 $R$  : 연결부에 작용하는 힘 벡터  
 $S_i$  : 일차 전역민감도 계수  
 $V$  : 분산  
 $\Omega$  : 부분구조의 영역  
 $X$  : 응답에 영향을 미치는 인자  
 $Y$  : 관심응답함수  
 $x_r^k$  : 구조물의 응답벡터

§ 이 논문은 대한기계학회 창립 70주년 기념 학술대회 (2015. 11. 10-14., ICC제주) 발표논문임.

† Corresponding Author, dooho@deu.ac.kr

© 2016 The Korean Society of Mechanical Engineers

상첨자

$k$  : k번째 부분구조

## 1. 서론

자동차의 진동소음 성능은 차량의 고객선호도를 결정하는 중요 성능중의 하나이다. 자동차의 목표 진동소음을 실현하기 위해서는 초기 설계단계에서 진동소음성능에 많은 영향을 미치는 엔진마운트, 부시 등의 연결부의 강성과 감쇠를 적절하게 배치하는 것이 중요하다.<sup>(1)</sup> 연결부의 감쇠를 적절히 배치하기 위해서는 연결부의 동특성값에 대한 목표 성능의 변화율, 즉 민감도해석이 필요하며 민감도 해석의 효율적인 방법을 위해 많은 연구가 수행되었다.<sup>(2-5)</sup> 그러나 엔진마운트, 부시 등의 동특성은 정하중과 진폭에 따라 변하는 비선형성을 보이는데 선형모델 기반의 해석적인 접근법으로는 이러한 비선형성을 고려하는 전역적인 민감도 해석을 수행하기는 계산비용, 해석식의 제한성 등의 문제로 대단히 어려웠다.

전역적인 민감도 해석을 수행하기 위해서는 몬테카를로 해석법(Monte Carlo Simulation Method, MCS법)과 같은 무작위 샘플링 기반의 해석법의 적용이 가능하다. 그러나 승용차의 진동소음 설계 문제와 같이 복잡한 시스템에 이러한 무작위 샘플링 기반의 해석법을 적용하기 위해서는 효율적인 샘플링 기법과 해석모델이 필요하다. 각 입력인자의 기여도를 얻기 위한 무작위 샘플링법으로는 Sobol 등의 제안에 기초한 방법이 일반적으로 쓰이고 있다.<sup>(6,7)</sup> 최근 Sobol의 방법보다 적은 수의 샘플링으로 입력인자의 일차민감도를 계산할 수 있는 무작위균형설계(random balance design, RBD) 방법이 제안되었다.<sup>(8)</sup> 이 방법은 종래의 푸리에진폭감도시험(Fourier Amplitude Sensitivity Test, FAST) 방법에 무작위순열을 도입하여 개선한 것으로 입력인자의 수에 무관하게 일정한 수의 샘플링만으로 일차 민감도를 계산할 수 있는 장점이 있다.

플러그인 디지털 프레임워크는 전체 시스템의 성능해석시 모듈의 동특성정보를 부분구조화(substructuring)하여 모듈화된 시스템 생산체계하에서도 전체시스템 해석모델의 구성이 가능하도록 지원하는 해석체계이다.<sup>(9)</sup> 모듈의 동특성 정보를 구성하는 방식으로는 특성행렬, 모달 파라미터, 주파수전달함수를 이용하는 방법 등이 있다. 주파수전달함수를 이용하는 방법은 자동차 진동소음 설계시 진동소음 성능에 대한 연결부 동특성의 영향을 살피는 경우 부분구조의 동특성에 대한 정보손실 없이 전체 시스템에 대한 해석모델을 재구성할 수 있어 대단히 유용하다. 또한 부분구조의 동특

성을 구성하는 주파수전달함수 행렬의 크기는 연결부 자유도의 수와 같아 매우 작게 되므로 샘플링 기반의 전역적 민감도 해석을 위한 시스템 모델 구성방법으로 큰 장점을 갖고 있다. 더욱이 연결부의 전역 민감도 해석에 집중할 경우 모듈의 동특성을 표현하는 주파수전달함수 행렬은 변하지 않으므로 효과적으로 연결부 동특성의 변화시 관심응답의 변화를 계산할 수 있다.

본 논문에서는 주파수전달함수 기반의 부분구조 합성법(FRF-Based Substructuring, FBS)과 무작위균형설계 기반의 응답 샘플링을 통해서, 자동차 진동소음 성능에 대한 연결부의 영향을 연결부 동특성의 전 변화범위에 대해서 계산하는 방법을 제안한다. 연결부를 이루는 엔진마운트와 부시의 동특성은 정하중 및 진폭에 따라 변하는 비선형성을 고려하고 이의 불확실성을 포함한다. 제안된 방법을 자동차 실내소음 모델에 대한 전역적 민감도 해석에 적용하고 그 특성을 살핀다.

## 2. 전역민감도 해석법

### 2.1 주파수응답함수기반 부분구조 합성법

주파수응답함수기반 부분구조합성법은 주파수응답함수로 부분구조의 동특성을 표현하고 연결부의 동특성과 적합성을 고려하여 전체 시스템의 응답을 구하는 방법이다. 응답표현식을 얻기 위하여 Fig. 1(a)와 같이 임의의  $n$ 개의 부분구조로 이루어진 구조계를 생각한다. 각 모듈은 강성  $K$ 와 손실 계수  $\eta$ 를 갖지만 질량은 무시할 수 있는 요소로 연결되어 있다고 가정한다. 각 모듈에는 외력벡터  $f^k$  ( $k=1, \dots, n$ )가 작용하고 있고, 관심응답은 임의의  $k$ 번째 부분구조의  $r$ 점에 있다고 가정한다. 본 논문의 표현식에서 상첨자는 부분구조의 위치를 나타내고 하첨자는 응답의 위치를 나타낸다. 임의의  $k$ 번째 부분구조에는 Fig. 1(b)와 같이 1개의 외력벡터  $f^k$ 와 다른 부분구조와의 연결점에서 작용하는  $n-1$ 개의 내력벡터  $R_j^k$  ( $j=1, \dots, n, j \neq k$ )이 작용하게 된다. 그러므로  $k$ 번째 부분구조의  $i$ 번째 연결점의 변위  $x_i^k$ 는 중첩의 원리에 의해서 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$x_i^k = \sum_{j=1, j \neq k}^n H_{ij}^k \cdot R_j^k + H_{ir}^k \cdot f^k, \quad i=1, \dots, n, i \neq k \quad (1)$$

여기서  $H_{ij}^k$ 는  $k$ 번째 부분구조에서 연결점  $j$ 와 연

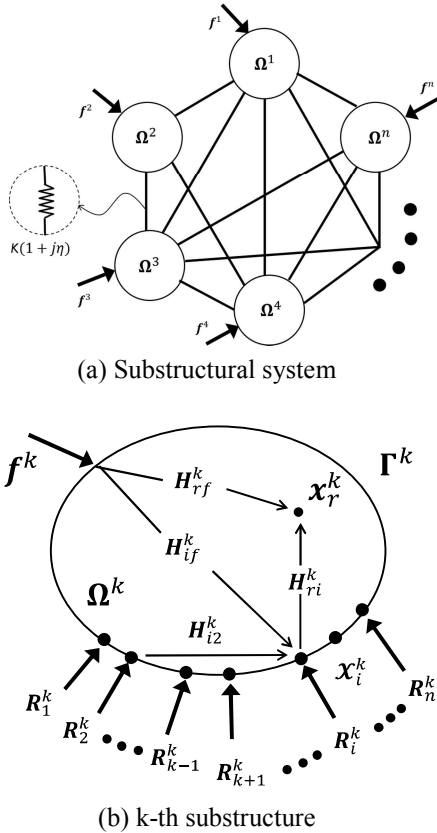


Fig. 1 Substructural system and its FRFs

결점  $i$ 에서의 주파수응답함수(frequency response function, FRF)이고  $H_{if}^k$ 는 외력점  $f$ 와 연결점  $i$ 와의 주파수응답함수이다.

식 (1)의 관심응답 표현식에 나타난 주파수응답 함수들은 부분구조에 대한 모델로부터 계산하거나 측정할 수 있으나 연결부의 내력벡터들은 아직 미지벡터이고 이 미지의 외력벡터를 구하게되면 연결점 및 임의의 위치에서의 응답을 중첩의 원리를 이용해서 계산할 수 있다. 미지벡터인 연결부의 내력벡터들은 작용-반작용의 법칙에 따라서 다음과 같은 관계식이 성립하게 된다.

$$R_i^k + R_k^i = 0, \quad i, k = 1, \dots, n, \quad i \neq k \quad (2)$$

또한, 연결부는 Fig. 1(a)와 같이 손실계수를 갖는 스프링으로 연결되어 있으므로 연결부의 변위와 내력은 다음과 같은 적합조건을 만족해야 한다.

$$C_{ki} \cdot R_i^k = x_i^k - x_k^i, \quad i, k = 1, \dots, n, \quad i \neq k \quad (3)$$

위 식에서  $C_{ki}$ 는 부분구조  $i$ 와  $k$ 를 잇는 연결부의 컴플라이언스 행렬을 나타내며 다음과 같은 대각

행렬이 된다.

$$diag(C_{ki}) = \frac{1}{K_{ki}(1 + \sqrt{-1}\eta_{ki})} \quad (4)$$

위 식에서  $K_{ki}$ 와  $\eta_{ki}$ 는 각각 부분구조  $i$ 와  $k$ 를 연결하는 연결부의 등가강성과 손실계수이다. 연결부 등가 강성과 손실계수는 방향성이 없으므로  $K_{ki} = K_{ik}$ 와  $\eta_{ki} = \eta_{ik}$ 의 성질을 갖는다.

식 (1)과 (2)를 식 (3)에 대입하고 모든 미지수 반력벡터에 대해서 정리하면 다음과 같은 대수방정식을 얻을 수 있다.

$$H \cdot R = Q \quad (5)$$

위 식에서 벡터  $R$ 은 각 연결부에서의 반력벡터를 모은 벡터로  $n(n-1)/2$  개의 벡터성분으로 구성되면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$R = \{R_2^1 \quad R_3^1 \quad \dots \quad R_n^1 \quad R_3^2 \quad \dots \quad R_{n-1}^{n-2} \quad R_n^{n-2} \quad R_n^{n-1}\}^T \quad (6)$$

식 (5)에서  $H$ 는 각 부분구조의 연결점 주파수응답함수행렬(식 (1)에서  $H_{ij}^k$ )들과 연결부의 컴플라이언스 행렬 (식 (2)  $C_{ki}$ )들이 각 부분구조의 연결관계에 따라서 결합되는  $n(n-1)/2 \times n(n-1)/2$  크기의 시스템 정방행렬이며, 벡터  $Q$ 는 외력과 관련된 기지의 벡터이다. 식 (5)를 이용하면 시스템 행렬  $H$ 의 역행렬을 구함으로써 연결부의 반력벡터  $R$ 을 구할 수 있다. 연결부의 반력을 구하면 임의의  $k$ 번째 부분구조에 위치하는 점  $r$ 에서의 관심 응답  $x_r^k$ 은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$x_r^k = \sum_{i=1, i \neq k}^n H_{ri}^k \cdot R_i^k + H_{rf}^k \cdot f^k \quad (7)$$

위 식에서  $H_{ri}^k$ 와  $H_{rf}^k$ 는 Fig. (1)에 그려진 것과 같이 연결점 및 외력점과 응답점 사이의 주파수응답함수행렬을 의미한다.

### 2.2 분산기반 전역 민감도 해석

관심응답  $Y$ 에 영향을 미치는 인자를  $X_k(k=1, \dots, q)$ 라 할 때 임의의  $i$ 번째 인자  $X_i$ 의 관심응답에 대한 영향도는  $X_i$ 에 대한 조건부 기대값,  $E(Y|X_i)$ 의 분산으로 정량화할 수 있다. 즉 조건부 기대값

$E(Y|X_i)$ 의 분산이 클수록  $X_i$ 의 관심응답에 대한 영향도가 크다고 정량화할 수 있다. 그러므로 일차 민감도계수  $S_i$ 는 전체 분산으로 이 조건부 기대값의 분산 크기를 정규화하여 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$S_i = \frac{V(E(Y|X_i))}{V(Y)} \quad (8)$$

위 식에서  $V$ 는 분산을 의미하고  $E$ 는 기대값을 표시한다.

### 2.3 무작위균형설계

식 (8)로 표현된 민감도 값이 정확하게 계산되기 위해서는  $q$ 차원인 영향인자의 공간상에서 충분한 수의 인자들이 표본으로 사용되어야 한다. 무작위균형설계법에서는 이를 위하여 우선  $[-, +]$  구간을 갖는 변수  $s$ 를 정의하고 임의의  $N$ 개의 표본을 구간에서 균일한 간격으로 추출한다. 추출된 수를  $s(j)(j=1, \dots, N)$ 라 하면 이를 이용하여  $q$ 개의 무작위 순열을 생성한다. 생성된 무작위 순열은 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$s_{ij} = s(P_i(j)), \forall i=1,2,\dots,q, \forall j=1,2,\dots,N \quad (9)$$

위 식에서  $P_i$ 는  $i$ 번째 무작위 순열을 의미한다. 식 (8)을 이용하여 각 인자의 레벨값은 다음 식에 의해 결정한다.

$$X_i(j) = G_i(\sin \omega s_{ij}), \forall i=1,2,\dots,q, \forall j=1,2,\dots,N \quad (10)$$

위 식에서 함수  $G$ 는 인자의 확률밀도함수에 따라서 결정되는 변환함수이며 영향인자의 대표적으로 누적분포역함수를 이용할 수 있다. 식 (10)에서  $\omega$ 는 각속도 값으로 고전적인 FAST 방법과는 달리 단일값을 사용한다. 식 (10)과 같이 추출된 각 영향인자 값은 다음과 같이  $N$ 개의 관심응답을 계산하는데 사용한다.

$$Y(j) = Y(X_1(j), X_2(j), \dots, X_q(j)), \forall j=1,2,\dots,N \quad (11)$$

계산된 관심응답을 이용하여 임의의  $i$ 번째 인자의 민감도를 계산하기 위해서는 우선 계산된 관심응답을  $X_i$ 의 값이 단조증가 하도록 순열을 재배치한다. 재배치된 순열을  $Y_i^R$ 이라고 하면 이 순열의 푸리에 스펙트럼은 민감도 정보를 정량화한 정보를 갖게 된다.<sup>(8)</sup>

$$F_i(\omega) = \left| \frac{1}{\pi} \sum_{j=1}^N Y_i^R(j) \exp(-\text{Im} \omega s(j)) \right|^2 \quad (12)$$

그러면 식 (8)의 식에서 분자항인  $i$ 번째 인자의 분산의 주효과는 푸리에 스펙트럼의  $M$ 차항까지 더하여 다음 식과 같이 계산할 수 있다.

$$\hat{V}_i = V[E(Y|X_i)] = \sum_{j=1}^M F_i(\omega)|_{\omega=j} \quad (13)$$

본 연구에서  $M$ 은 6으로 한정한다. 다른 영향인자의 민감도를 계산하기 위해서는 계산된 관심응답을 해당 인자의 단조증가 순서로 재배치하고 식 (12~13)의 과정을 반복하면 된다.

## 3. 승용차 소음문제에의 적용

2장에서 기술된 전역민감도 해석법을 승용차 실내소음에 대하여 엔진마운트 시스템의 연결부 강성의 영향을 계산하기 위하여 적용하였다. 승용차 엔진마운트 시스템은 Fig. 2와 같이 파워트레인을 지지하는 4개의 부분구조로 이루어져 있다. Fig. 2(a)에 나타낸 바와 같이 부분구조 A는 엔진, B와 C는 엔진 지지구조물 부분구조 D는 실내 음향공간을 포함하는 차체를 나타낸다. 엔진지지 시스템은 4개의 엔진마운트와 지지구조물을 차체에 연결하는 6개의 부시로 구성되어 있다.

실내소음에 대한 주파수전달함수 기반의 부분구조합성법 모델을 구성하기 위하여 엔진과 엔진 지지구조물은 강체모드를 이용하여 주파수응답함수를 구성하였고<sup>(10)</sup>, 차체 연결점 사이의 주파수응답함수와 차체 연결부와 실내 음향공간 사이의 소음 전달함수(noise transfer function, NTF)는 측정값을 사용하였다. 외력은 엔진의 폭발력과 관성력을 고려하여 엔진의 무게중심점에 부가하였다. 주파수 전달함수 기반의 부분구조합성법을 이용한 응답의 계산은 MATLAB 환경하에서 개발된 자체 소프트웨어를 사용하였다.

실내소음은 주파수(엔진회전수)의 함수이기 때문에 실내소음의 크기를 대표하는 관심응답을 정의하기 위하여, 실내소음의 크기를 엔진회전수의 함수로 데시벨(decibel, dB)로 그래프상에서 표기하고 실내소음의 크기가 1000~4000 rpm영역에서 80 dB가 넘는 영역의 넓이를 관심응답함수로 정의하였다.

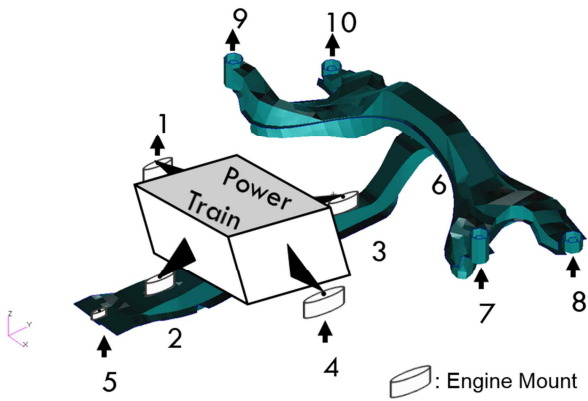
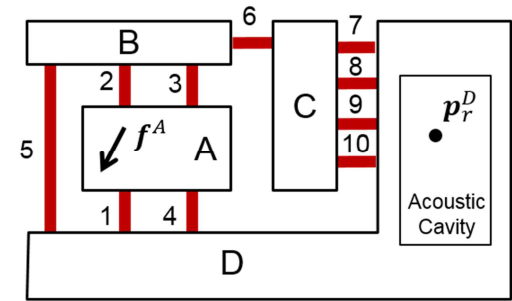


Fig. 2 Substructures in a passenger car

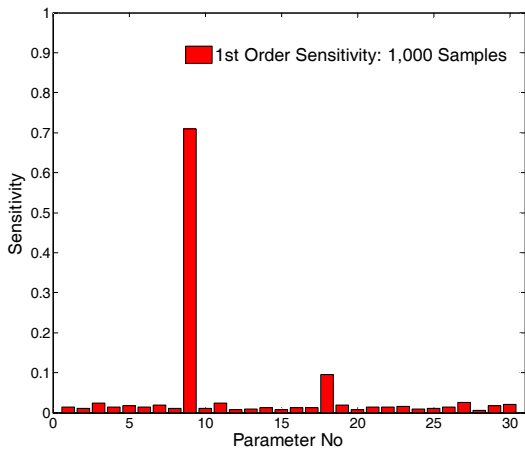


Fig. 3 Global sensitivity results for the interior noise problem

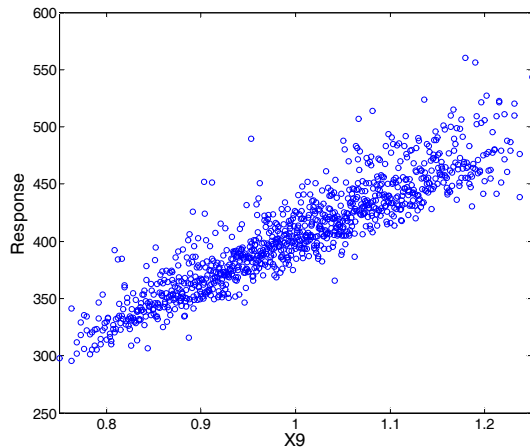
실내소음에 영향을 미치는 인자로 엔진의 가진력이 차체로 전달되는 경로상의 10개의 연결부(엔진마운트와 부시) 강성을 선정하고 무작위균형설계법을 이용하여 각 연결부 강성의 전역 민감도를 계산하였다. 각 연결부 강성의 분포는 Table 1과 같이 각 연결부의 특성을 고려하여 결정하였다. Table 1의 강성분포는 각 엔진마운트의 비선형성과 산포를 고려하고 각 부시의 특성을 고려하여 본

Table 1 Stiffness distributions for joint elastomers

Joints No	Lower Bound (%)	Upper Bound (%)	Distribution type
1	-30	+30	Beta(a=b=2)
2	-25	+25	Beta(a=b=2)
3	-25	+25	Beta(a=b=2)
4	-30	+30	Beta(a=b=2)
5	-20	+20	Beta(a=b=2)
6	-20	+20	Beta(a=b=2)
7	-15	+15	Beta(a=b=2)
8	-15	+15	Beta(a=b=2)
9	-15	+15	Beta(a=b=2)
10	-15	+15	Beta(a=b=2)

논문에서 제안한 전역민감도 해석의 유용성을 보이기 위한 예제로 간략하게 추정한 것이다. 각 연결부의 강성은 세 수직방향 모두를 별도로 고려하여 총 30개의 설계인자로 구성된다.

본 논문에서 제안한 전역민감도 계산을 위하여 MATLAB 환경에서 자체 소프트웨어를 개발하여 승용차 실내소음 문제에 대한 계산을 수행하였다. Fig. 3은 무작위균형설계법의 샘플수를 1000 (N=1000)으로 사용하여 계산한 전역민감도 해석 결과이다. Fig. 3은 여러 인자의 변화로 발생한 관심응답의 분산값에서 9번 인자(X9, 3번 연결부의 Z방향 강성)의 영향이 가장 큰 부분을 차지하고 18번 인자(6번 연결부의 Z방향 강성)의 영향이 상당하다는 것을 정량적으로 보여준다. 나머지 연결부의 강성값은 그 영향이 미미함을 알 수 있다. 이는 9번인자를 통하는 전달경로가 관심응답함수에 영향을 가장 크게 미치고 있다는 것을 의미한다. 그러므로 관심응답의 개선을 위해서 전역민감도 해석을 수행하면 우선 고려해야 할 설계인자의 선정을 체계적으로 수행할 수 있다. 여기서 주의해야 할 것은 Fig. 3의 전역민감도 결과에는 인자의 변동성이 포함되어 있다는 것이다. 즉, 계산된 전역민감도 값은 관심응답의 섭동양에 대한 각 인자의 기여도이며 특정점에서의 대상인자에 대한 일차 미분값을 나타내는 것은 아니다. 이는 전역민감도의 개념이 특정인자에 대한 선형기울기 정보가 아니고 넓은 영역에서의 전역적 현상을 보고자 하기 때문이므로 정보의 구별이 필요하다. 제시한 전역민감도 해석법을 이용하여 선형기울기 정보를 얻기 위해서는 Table 1에 예시한 각 인자의 분포를 동일하게 부여하거나, 모든 샘플에서 관심 인자와 관심응답 사이의 선형 상관계수(correlation coefficient)와 선형기울기를 구하여 사용할 수 있다. 예를 들어, Fig. 4는 9번 인자와 응답을 모든 샘플에 대해



**Fig. 4** Scatter plot between parameter X9 and the response

서 그린 것이다. Fig. 4를 보면 X9과 관심응답 사이의 큰 상관관계를 볼 수 있으며 선형적합을 통한 기울기 정보를 얻을 수 있다. 그러나 동시에 Fig. 4를 보면 인자가 커짐에 따라 산포가 커지고 약한 비선형 상관관계를 볼 수 있어 전역민감도 해석값과 선형기울기와의 차이를 이해할 수 있다.

플러그인 디지털 프레임웍에서는 해석하고자 하는 관심응답의 계산을 위해서 외부에서 제공받는 부분구조의 해석모델을 합성하여 사용하는 것을 기본 전제로 한다. 부분구조의 모델은 기하학적 정보가 숨겨진 형태로 주파수전달함수 또는 모드 기반의 합성법을 사용하게 되며 이 두 방법의 모델은 원리적으로 전환 가능하다. 이러한 환경하에서 본 논문에서 제시한 전역민감도 해석법은 축소된 형태의 시스템 모델을 빠르게 재구성하는 방법으로 효율적으로 전역민감도 해석을 수행할 수 있는 장점이 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 플러그인 디지털 프레임웍에서 연결부의 비선형성과 산포를 고려한 전역민감도 해석을 수행할 때 주파수전달함수 기반의 부분구조합성법과 무작위균형설계법에 기초하는 방법을 제안하였다. 또한 제안된 방법을 승용차의 실내소음문제와 같은 복잡계 적용하여 유용성을 보였다. 제안된 방법은 다중 부분구조를 연결하는 연결부의 특성에 대한 전역민감도 정보를 주파수응답함수 기반의 부분구조합성법 모델로 축소된 시스템 모델을 사용하여 효율적으로 계산할 수 있어 모델 검증이나 설계개선에 유용하게 사용될 수 있다.

#### 후 기

본 연구는 산업통상자원부의 2015년도 산업원천 기술개발사업 중 지식서비스 분야의 지원을 받아 수행된 연구이며(10048305), 이에 감사 드립니다.

#### 참고문헌 (References)

- (1) Lee, D., Kim, Y.-D., Lee, N.-Y. and Lee, S.-W., 2015, "On Joint Mobility Design in Multi-structural Systems," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, Vol. Published online No. pp.doi: 10.1177/0954407015595908.
- (2) Lee, D.-H. and Hwang, W.-S., 2003, "Parametric Optimization of Complex Systems Using a Multi-domain FRF-based Substructuring Method," *Computers & Structures*, Vol. 81, No. 22-23, pp. 2249~2257.
- (3) Lee, D. H., Hwang, W. S. and Kim, C. M., 2002, "Design Sensitivity Analysis and Optimization of an Engine Mount System Using an FRF-based Substructuring Method," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 255, No. 2, pp. 383~397.
- (4) Kim, N. H. and Dong, J., 2006, "Shape Sensitivity Analysis of Sequential Structural-acoustic Problems Using FEM and BEM," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 290, No. 1-2, pp.192~208.
- (5) Choi, K. K., Shim, I. and Wang, S., 1997, "Design Sensitivity Analysis of Structure-induced Noise and Vibration," *Journal of Vibration and Acoustics*, Vol. 119, No. 2, pp.173~179.
- (6) Saltelli, A. and Tarantola, S., 2002, "On the Relative Importance of Input Factors in Mathematical Models: Safety Assessment for Nuclear Waste Disposal," *Journal of the American Statistical Association*, Vol. 97, No. 459, pp.702~709.
- (7) Sobol', I. y. M., 1990, "On Sensitivity Estimation for Nonlinear Mathematical Models," *Matematicheskoe Modelirovanie*, Vol. 2, No. 1, pp.112~118.
- (8) Tarantola, S., Gatelli, D. and Mara, T. A., 2006, "Random Balance Designs for the Estimation of First Order Global Sensitivity Indices," *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 91, No. 6, pp.717~727.
- (9) Lee, D. and Won, Y.-W., 2015, "On Exchange Methods of Structural Information in Plug-in Automotive Vibration Model," *The Fall Annual Meeting of the Korean Society of Mechanical Engineers: CAE & Applied Mechnaics Division*, Vol. No. pp. 437~438.
- (10) Hwang, W. and Lee, D., 2002, "Substructure Analysis of Complex Systems Using Rigid Body Information of Components," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, Vol. 216, No. 10, pp. 811~817.